

На правах рукописи

ПЫХТЕЕВА Ксения Борисовна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМА ЗАГРУЗКИ ДОМЕННЫХ
ПЕЧЕЙ ПРИ ПЛАВКЕ ТИТАНОМАГНЕТИТОВ

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург
2011

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Научный руководитель:

Доктор технических наук
Загайнов Сергей Александрович

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук
Спирин Николай Александрович
Кандидат технических наук
Чесноков Юрий Анатольевич

Ведущая организация:

ОАО «ВНИИМТ»

Защита состоится «23» декабря 2011 г. в 15 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 при ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» в ауд. I (зал Ученого Совета) главного корпуса по адресу: г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ФГАОУ ВПО «УрФУ», ученому секретарю совета.
Факс (343) 3743884.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».

Автореферат разослан « » ноября 2011 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, проф., д.т.н.

С. В. Карелов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Преимущества бесконусных засыпных устройств (БЗУ) лоткового типа общеизвестны. Наибольшая эффективность использования БЗУ достигается при четком согласовании программы выгрузки шихты из бункеров с программой формирования порции в бункерах. Задача формирования порции в бункере БЗУ наиболее остро стоит при ограниченных возможностях системы подачи шихты с рудного двора на реконструированных доменных печах. Это обусловлено необходимостью размещения бункеров на ограниченных площадях. Теоретический анализ, основанный на современной теории сыпучих сред, позволяет сформировать научный подход к решению конкретных задач. Эффективность решения этих задач во многом определяется достоверностью данных, которые могут быть получены только экспериментальным путем и адекватностью математических моделей, используемых в прогнозных расчетах.

Поэтому экспериментальные и теоретические исследования закономерностей формирования столба шихтовых материалов в доменной печи, направленные на разработку технических решений, обеспечивающих целенаправленное формирование столба шихтовых материалов в доменной печи, являются актуальными задачами, имеющими практическое значение.

Цель работы. Основная цель диссертационного исследования состояла в совершенствовании математических моделей формирования столба шихтовых материалов на основе экспериментальных исследований и теоретического анализа процессов движения сыпучих сред и разработке рекомендаций по совершенствованию загрузки шихты на доменных печах, оборудованных бесконусным загрузочным устройством.

Достижение поставленной цели потребовало:

- проведения экспериментальных исследований траекторий выгрузки на колошник шихтовых материалов;
- уточнения математических моделей и разработки программного обеспечения для прогнозной оценки распределения компонентов шихты на поверхности засыпи;

- выявления факторов, влияющих на колебания состава продуктов плавки;
- организации и проведения промышленных исследований разработанных мероприятий.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Получены новые данные о характере ссыпания шихты с лотка БЗУ и формирования профиля засыпи в печи. Уточнены значения углов откоса и коэффициентов внутреннего трения при укладке материалов на колошнике.
2. Установлено, что формой профиля гребня является трапеция. Для расчета параметров трапеции разработана математическая модель.
3. Развиты представления о факторах, определяющих колебания состава продуктов плавки.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

1. Разработаны, опробованы и частично внедрены научно обоснованные рекомендации по загрузке шихты в доменные печи, которые базируются на использовании уточненных математических моделей и результатах промышленных исследований.
2. Разработанные математические модели могут использоваться как при выборе программы загрузки многокомпонентной шихты, так и при выборе реконструктивных мероприятий.

Внедренный комплекс рекомендаций и мероприятий по совершенствованию загрузки шихты на доменных печах, оборудованных бесконусным загрузочным устройством, обеспечил снижение доли некондиционного чугуна по содержанию серы на 1,4 % (абс.) и увеличение коэффициента извлечения ванадия на 1,12 % (абс.).

Достоверность полученных результатов основывается на использовании современных методик исследования и подтверждена опытно-промышленными испытаниями на работающих доменных печах.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на международном конгрессе доменщиков «Доменное производство – XXI век» (г. Москва, 2010 г), на международной научно-практической конференции «Творческое наследие Б.И. Китаева» (г. Екатеринбург, 2009 г), на

международной научно-практической конференции «Повышение качества образования и научных исследований» в рамках VII Сатпаевских чтений (г. Экибастуз, 2008 г), на 38-ой и 39-ой международных научно-технических конференциях молодых специалистов ОАО «НТМК» (г. Н. Тагил, 2006 и 2007 гг), на XIV отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ (г. Екатеринбург, 2008 г), на региональных научно-технических конференциях «Наука – Образование – Производство»: опыт и перспективы развития (г. Нижний Тагил, 2009 и 2011 гг), на региональных научно-практических конференциях студентов и аспирантов «Молодежь и наука» (г. Нижний Тагил, 2007, 2009 и 2010 гг).

Публикации. Основное содержание работы отражено в 20 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы из 119 наименований; изложена на 158 стр. машинописного текста, включая 76 рисунков и 23 таблиц.

На защиту выносятся:

- результаты исследований особенности формирования столба шихтовых материалов с использованием БЗУ;
- практические результаты использования разработанных математических моделей;
- результаты промышленной реализации разработанных мероприятий по повышению стабильности химического состава ванадиевого чугуна на доменных печах, оборудованных БЗУ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана краткая характеристика современного состояния доменного производства, показано, что одним из перспективных путей снижения материальных и энергетических затрат на производство чугуна является использование БЗУ, обоснована актуальность и сформулирована цель диссертационной работы.

В первой главе представлен аналитический обзор исследований по теоретическому и экспериментальному изучению закономерностей формирования столба шихты в доменной печи. Отражены современные представления о закономерностях движения сыпучих материалов. Приведены литературные данные по изучению формирования и движения материалов в бункерах. Рассмотрены особенности системы загрузки доменной печи с бесконусным загрузочным устройством лоткового типа. Обобщены закономерности истечения материала из бункера БЗУ, движения по наклонной плоскости (лотку) и при свободном падении в подкупольном пространстве доменной печи. Проанализированы особенности доменной плавки ванадийсодержащих титаномагнетитов.

Рассмотрены особенности системы шихтоподачи исследуемых доменных печей, реконструкция которых осуществлялась с учетом ограниченного пространства. Именно ограничения на габариты оборудования системы шихтоподачи не позволили в полной мере использовать все преимущества БЗУ.

Общепризнанным фактом является наличие жестких ограничений на тепловое состояние и шлаковый режим доменной плавки ванадийсодержащих титаномагнетитов. При восстановлении оксидов титана образуются карбиды и карбонитриды титана, которые приводят к повышенным потерям чугуна со шлаком. Это накладывает ограничения на тепловое состояние печи. Степень извлечения ванадия в чугун зависит от многочисленных факторов, таких как основность шлака, его количество, температура чугуна и др.

Выплавка ванадиевого чугуна ведется на агломерате с основностью 2,0-2,2, неофлюсованных окатышах с использованием флюсующих добавок. Локальное расположение, каждой из составляющей шихты в объеме печи, приводит к образованию зон с различными условиями протекания физико-химических процессов. Поэтому одной из основных задач управления формированием столба шихтовых материалов является задача минимизации локальных неоднородностей столба шихты.

Поскольку физический контроль состава столба шихты в печи не нашел широкого распространения, основным методом решения задач управления

загрузкой основан на математическом моделировании. Известные математические модели не вполне совершенны, что связано с трудностями при их адаптации к конкретным условиям плавки.

В результате выполненного анализа литературных данных определены цели и конкретные задачи исследований.

Во второй главе представлены результаты специально организованных экспериментальных исследований на доменной печи №5 НТМК, выполненных с целью уточнения коэффициентов математической модели для прогноза формирования профиля засыпи в печи. Необходимость организации таких исследований показал опыт пуска доменной печи № 6, задутый в 2004 году. При освоении проектной мощности печи программа загрузки подбиралась эмпирически достаточно длительное время.

Методика исследований была ориентирована на определение участков падения отдельных компонентов шихты при выбранных угловых положениях лотка. Исследования выполнялись во время загрузки шихты перед пуском печи. Проводилась непрерывная видеосъемка потока шихты при его ссыпании с лотка. Длительность видеосъемки составляла более 5 часов. Кроме того, при достижении уровня засыпи 1,5 м, для определения расположения различных материалов на колошнике при различных параметрах работы БЗУ, на поверхности шихты устанавливались коробки емкостью 0,125 м³. Измерялись массы и углы откоса шихтовых материалов в каждой коробке. Фрагменты видеосъемки потока шихты и физических замеров приводятся на рис. 1 и 2.

Обработка результатов позволила уточнить коэффициенты модели расчета траекторий в рабочем пространстве печи. Для моделирования потока материалов при углах наклона лотка от 45 до 25 градусов получены следующие упрощенные уравнения:

$$\text{для кокса:} \quad h = 0,036r^2 + 1,629r - 3,028;$$

$$\text{для окатышей:} \quad h = 0,012r^2 + 1,582r - 2,990;$$

$$\text{для агломерата:} \quad h = 0,016r^2 + 1,591r - 2,997,$$

где h – вертикальная составляющая координаты потока от точки h_0 , м;

r – горизонтальная составляющая координаты потока от оси печи, м.

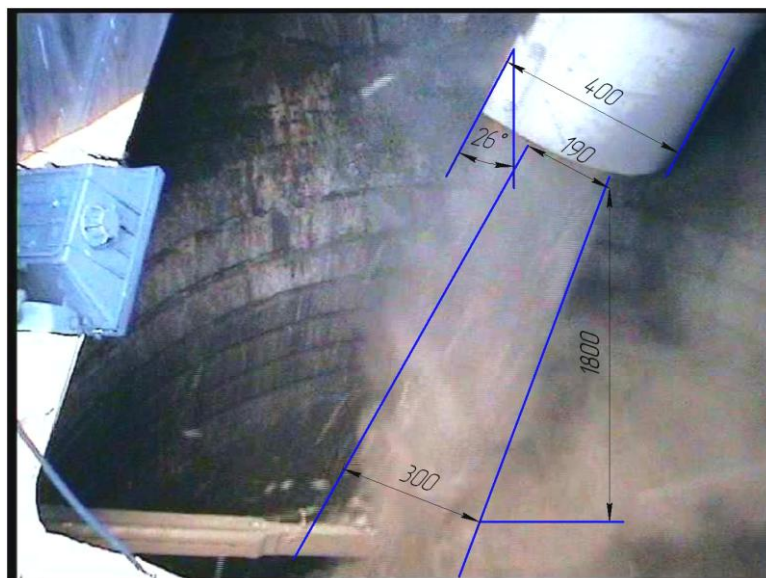


Рис. 1. Фото-видеосъемка выгрузки материалов в период шихтозаполнения

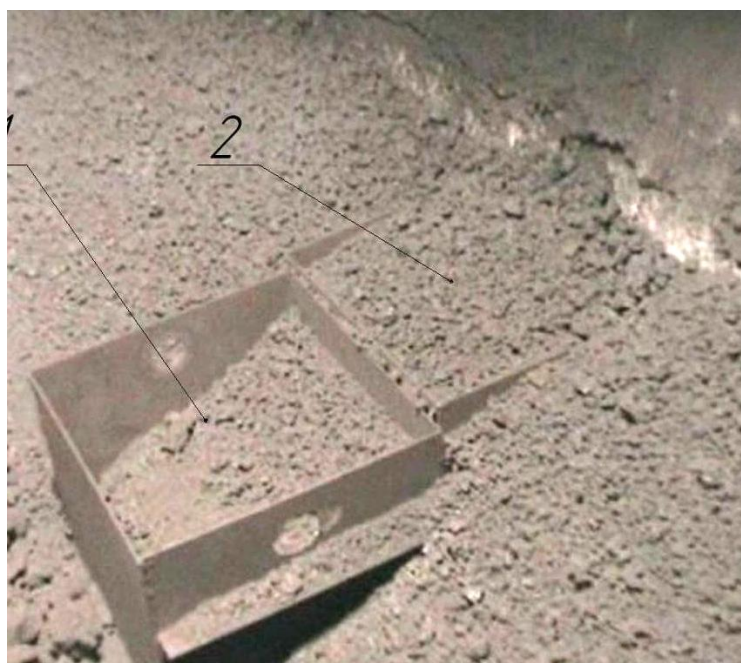


Рис. 2. Физические замеры

Таблица 1

Результаты обработки видеосъемки

Материал	Угол наклона лотка, град	Угол откоса, град	Высота падения материала, мм	Ширина потока у края лотка h , мм	Ширина потока у поверхность и засыпи h' , мм	Уширение потока материала $\frac{h'}{h}$
кокс	21	25	1800	180	300	1,67
	26		1800	190	300	1,58
	48		2000	280	330	1,18
окатыши	44	13	1800	250	330	1,32
агломерат	48	17	1800	250	270	1,08

Установлено, что ширина потока по мере его движения в рабочем пространстве печи возрастает. Обработка результатов видеосъемки позволила найти коэффициенты уширения потока для агломерата, окатышей и кокса, а также углы откоса материалов (табл.1).

Уширение потока при его ссыпании с лотка приводит к тому, что сечением фигуры, формируемой на поверхности засыпи, является трапеция.

Сопоставление экспериментальных результатов с теоретическими данными о траектории падения материала шихтовых материалов с лотка позволило создать и откорректировать математическую модель с определённой степенью точности (рис. 3).

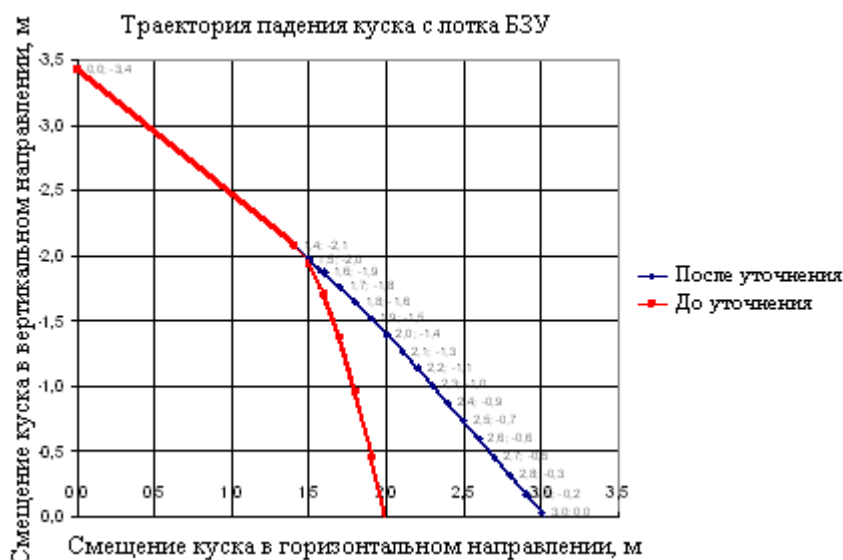


Рис. 3. Адаптация модели к реальным условиям

После предварительной обработки экспериментальных данных на пятые сутки работы доменной печи № 5 изначально установленная программа загрузки (загрузка материала на 11 угловых положений лотка) была изменена. Смена системы загрузки обеспечило требуемое и более равномерное распределение газового потока по сечению колошника (рис. 4).

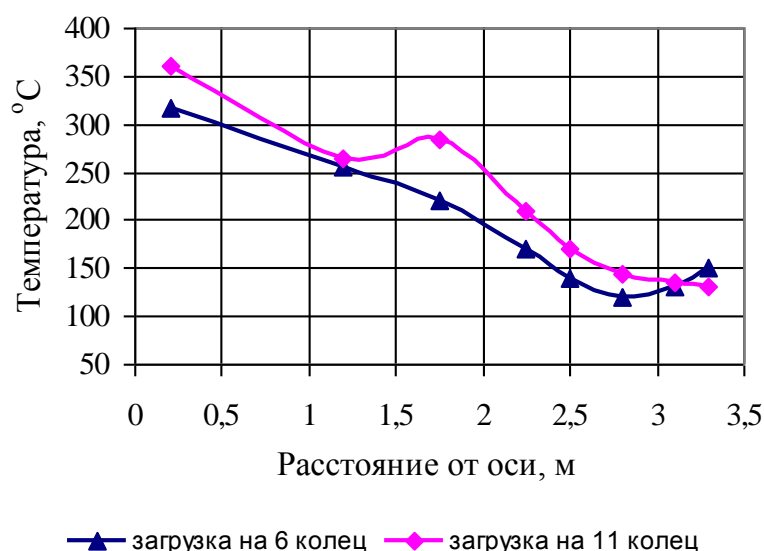


Рис. 4. Распределение газового потока при разных программах загрузки

По разработанному и согласованному предложению загрузка материалов на колошник ведется при неизменных углах наклона лотка по соответствующим позициям из условия распределения шихты на 8 равновеликих по площади колец. Использование откорректированной модели и разработанных рекомендаций позволило повысить качество управления движениями газа и шихты и способствовало освоению проектной производительности за более короткое время (табл. 2).

Таблица 2

Освоение проектной производительности доменных печей

Показатели	ДП 6		ДП 5	
	График	Факт	График	Факт
Освоение проектной производительности, сутки	80	56	82	39
За 1 год работы печи				
Выплавка чугуна в переводе на передельный, т	1 108700	1 490030	1 727676	1 824023
Освоение проектной мощности, %	93,3	92,0	94,1	99,3

Таким образом, экспериментальные измерения траектории движения материалов позволило адаптировать математическую модель к реальным условиям, а также изменить систему загрузки материалов, что дало возможность снизить время освоения проектной производительности.

Формирование структуры расположения материалов в бункере БЗУ определяется последовательностью набора компонентов шихты в скипы, геометрией конкретного бункера и углами естественного откоса различных материалов. На основе этого разработана математическая модель формирования порций в бункере БЗУ (рис. 5) и применительно к геометрии бункера БЗУ ДП № 5 выведены упрощенные уравнения для характеристики расположения в нем материалов:

$$h_x = 1,67138 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_{M1} + 10,987}{\pi(0,13928 + (tg \alpha_1)/24)}} - 5,7012$$

Diagram illustrating the cross-section of a blast furnace gas outlet, showing the distribution of slag (окатыши) and agglomerate (агломерат) layers. The diagram includes dimensions in meters:

- Total height: 4.17
- Height of the slag layer (окатыши): 3.67
- Height of the agglomerate layer (агломерат): 1.89
- Width of the slag layer at the top: 4.01
- Width of the agglomerate layer at the bottom: 2.89
- Parameter h_x is indicated for the agglomerate layer.
- Parameter d_x is indicated on the right side.

Характер и последовательность истечения материалов из бункера БЗУ определяется закономерностями образования и разрушения динамически неустойчивых сводов, создающих над выпускным отверстием эллипсоид разрыхления (рис. 6). На основе анализа характера истечения материала из бункера БЗУ разработана математическая модель применительно к

существующей системе загрузки доменной печи. Расчет конфигурации тела выпуска (рис. 7) производится итерационной процедурой. Для оперативного расчета распределения материалов на колошнике создано программное обеспечение. Исходными данными для моделирования являются прядок набора материалов и их масса в скипах, а также программа работы БЗУ.

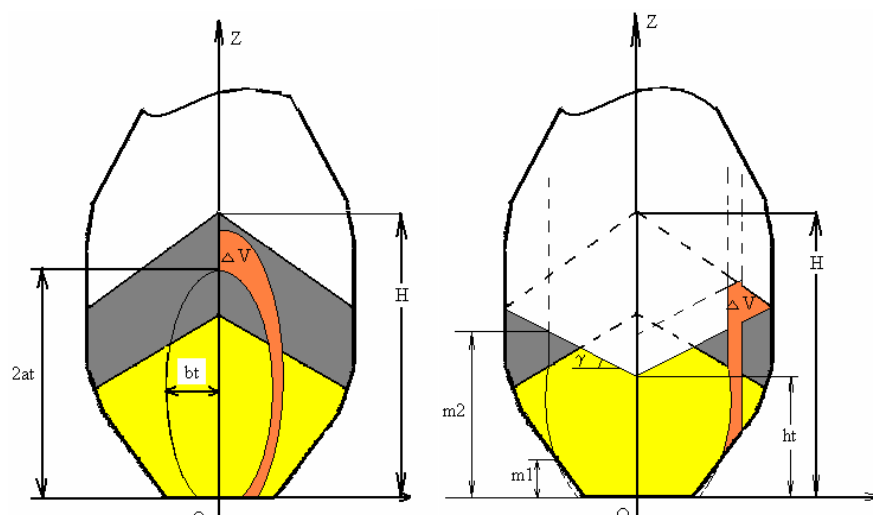


Рис. 6. Истечение материалов из бункера БЗУ

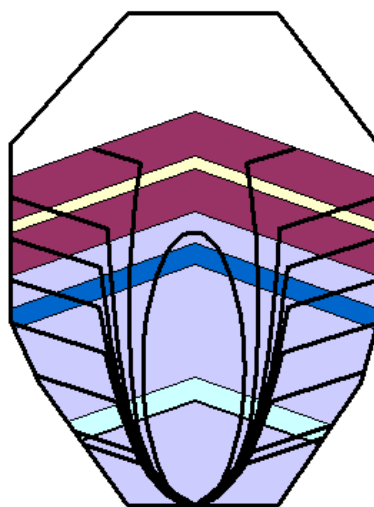


Рис. 7. Изменение конфигурации тела выпуска

Результатом расчета с использованием разработанного алгоритма является определение вещественного и химического состава шихты как в объеме бункера БЗУ, так и по сечению колошника (или каждого кольца при заданном их количестве) с построением соответствующих графиков и диаграмм.

Результаты моделирования показали, что стабильность химического состава рудной составляющей на колошнике во многом зависит от соотношения агломерата и окатышей в шихте, что должно проявляться в

колебаниях состава продуктов плавки по ходу выпуска (рис. 8). В основном это связано с необходимым расходом флюса на плавку.

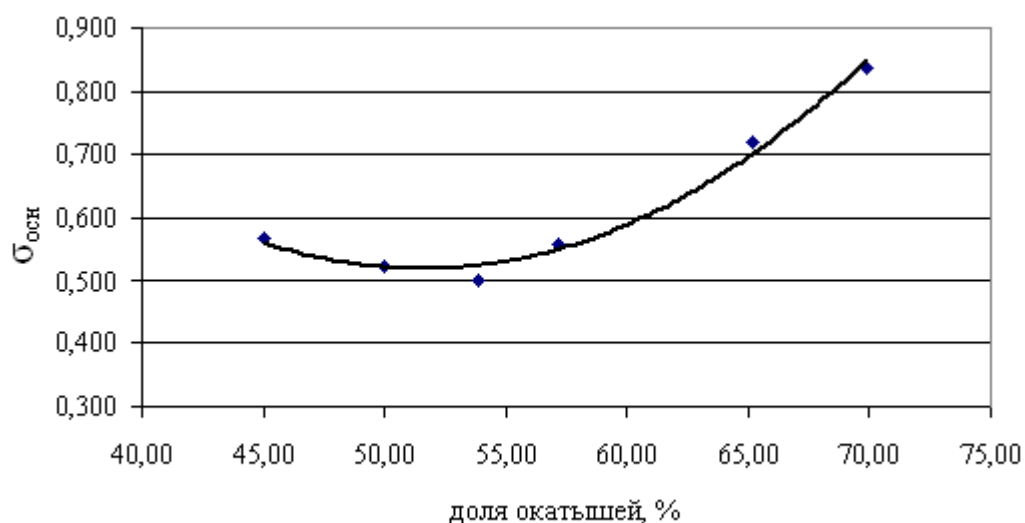


Рис. 8. Влияние доли окатышей в шихте на стабильность основности по сечению колошника (при использовании железофлюса с $B = 5,4$)

Адекватность разработанной модели проверялась путем анализа производственных данных при различных шихтовых условиях.

Для проверки влияния состава шихты (расхода известняка) на стабильность химического состава продуктов плавки был организован промышленный эксперимент на доменной печи № 6. Исследования включали в себя два опытных периода. В первом периоде, с 14.07.07 по 18.07.07, железорудная часть шихты состояла из 50 % высокоосновного агломерата и 50 % неофлюсованных окатышей. Удельный расход известняка при этом снизился с 70 – 75 до 39 кг/т чугуна. Во втором опытном периоде, с 03.10.07 по 05.10.07, железорудная часть шихты состояла из 60 % высокоосновного агломерата и 40 % неофлюсованных окатышей. Известняк при этом был практически выведен из шихты (расход – 6 кг/т чугуна). При снижении расхода известняка до 39 кг/т чугуна, значительно увеличивается его относительная доля, попадающая на периферийное кольцо, и резко снижается доля известняка, попадающая к центру печи. В целом, заметно усиливается как радиальная, так и окружная неравномерность в распределении известняка. При этом известняк, попадающий на периферию, ложится локально, занимая лишь от 8 до 17 % площади сегмента крайнего периферийного кольца (при выгрузке на него от 5

до 10 % всей массы рудной части шихты). Поэтому стабильность по основности шлака ухудшается и, как следствие, возрастают колебания содержания в чугунах серы и ванадия. Практически полное исключение известняка из шихты, как видно (табл. 3), значительно улучшает стабильность состава чугуна и шлака по содержанию всех компонентов без исключения. Это подтвердило теоретические выводы.

Таблица 3

Среднеквадратичные отклонения компонентов продуктов плавки
(состав железорудной части шихты – 60 % агломерата, 40 % окатышей)

σ_n / период	Базовый (1.09–30.09)	Опытный (03.10–05.10)	Сравнительный (7.10–9.10)
$\sigma_{\text{осн. шлака}}$	0,0313	0,0202	0,0271
$\sigma_{[\text{Si}]}$	0,0221	0,0152	0,0252
$\sigma_{[\text{Ti}]}$	0,0393	0,0279	0,0433
$\sigma_{[\text{V}]}$	0,0411	0,0183	0,0335
$\sigma_{[\text{S}]}$	0,0047	0,0031	0,0037
$\sigma_{[\text{Mn}]}$	0,0395	0,0291	0,0389

Оценка колебаний химического состава продуктов плавки при различном соотношении агломерата и окатышей в шихте производилась по анализам выпусков (114 выпусков в трех периодах с долей окатышей 60, 50 и 40 %). Среднеквадратичные отклонения основности шлака при доле окатышей 60 % составили 0,0313, а при 40 % – 0,0202. Сравнение дисперсий ($D = \sigma^2$) по критерию Фишера при $\alpha = 0,05$ ($F = 2,4 > F_{\text{крит}} = 1,76$) показало значимость различий и, соответственно, существенное влияние на стабильность продуктов плавки расхода известняка.

В четвертой главе приведены результаты моделирования, промышленных испытаний и внедрения мероприятий, направленных на повышение стабильности состава продуктов доменной плавки ванадийсодержащих титаномагнетитов.

Результатом математического моделирования явилось определение зон расположения известняка на поверхности засыпи при различном его расположении в бункере БЗУ. Конструкция системы шихтоподачи не позволяет

равномерно (в смеси с неофлюсованными окатышами) распределить известняк в бункере БЗУ.

Одним из вариантов повышения равномерности распределения состава шихты на поверхности засыпи является перемешивание агломерата и окатышей на конвейере бункерной эстакады.

Для определения эффективности смешивания была организована загрузка доменной печи № 6 в режиме частичного смешивания агломерата и окатышей, путем пропорционального набора в каждый скип заданного количества и агломерата, и окатышей.

Таблица 4

Среднеквадратичные отклонения компонентов продуктов плавки

период σ_n	Базовый	Опытный (режим смешивания)	Сравнительный
$\sigma_{\text{осн шлака}}$	0,0332	0,0265	0,0274
$\sigma_{[V]}$	0,0357	0,0289	0,0446
$\sigma_{[S]}$	0,0059	0,0051	0,0061

Как видно из табл. 4, стабильность содержания ванадия и серы в чугуна, а также основности шлака заметно возросла. Более наглядно повышение стабильности состав шлака отражается количеством выпусков (%), укладываемых в пределы колебаний $\pm 0,05$ от среднего значения по периоду. Если в базовом и сравнительном периодах это значение практически одинаково — 89,3 и 89,2 % соответственно, то в опытном периоде оно составило 94,5 %. Снижение колебаний химического состава продуктов плавки способствовало значительному улучшению качества чугуна по содержанию серы. Все это подтверждает целесообразность предварительного смешивания компонентов шихты перед загрузкой их в доменную печь. Однако данное мероприятие не исключает негативного влияния локального расположения известняка.

Неравномерность распределения известняка на поверхности засыпи оценивалась с помощью кольцевых диаграмм (рис. 9). Рассматривались варианты загрузки известняка в нижнюю (рис. 9, а), среднюю (рис. 9, б) и верхнюю части бункера. При принятой программе работы лотка, наибольшая

равномерность достигается при расположении известняка ближе к центру печи, что достигается его размещением в середине бункера БЗУ. При данном расположении известняка обеспечивается окружная равномерность за счет замыкания колец в центральной части, так как площадь этих колец мала.

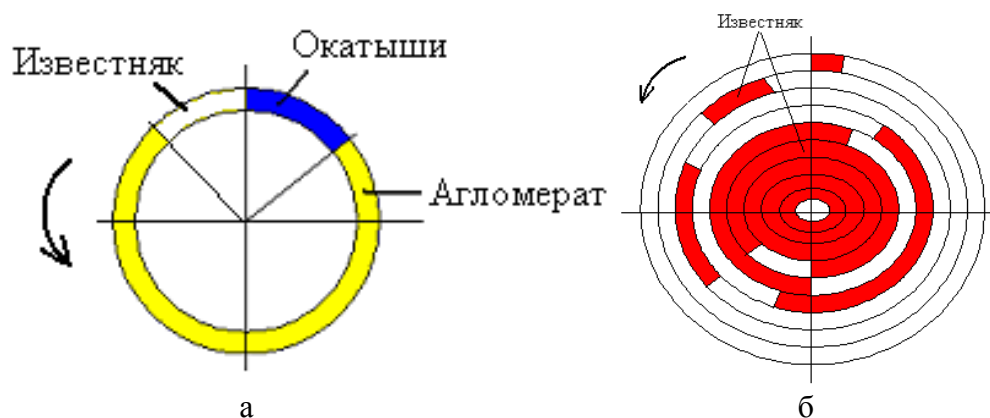


Рис. 9. Схемы распределения известняка на колошнике
а – структура периферийного кольца при расположении известняка на дне бункера БЗУ;
б – распределение известняка при расположении его в середине бункера БЗУ

Для подтверждения математического моделирования влияния распределения известняка по сечению печи на стабильность продуктов плавки были организованы промышленные испытания.

Для определения рационального способа размещения известняка в бункере БЗУ был проведен промышленный эксперимент на доменной печи № 5. Было опробовано три варианта размещения известняка в бункере БЗУ: в низу, в середине и в верху. Продолжительность каждого варианта (этапа) составляла 2-е суток. Производился отбор проб чугуна и шлака с интервалом 10 минут при разных способах размещения известняка в бункере БЗУ. Результаты оценивались по изменению стабильности состава продуктов плавки, как в течение выпуска, так и по паспортным анализам выпусков.

Из табл. 5 видно, что при размещении известняка на днище бункера БЗУ стабильность состава продуктов плавки наихудшая по всем показателям. Минимальные колебания по содержанию СаО в шлаке достигаются при расположении известняка в середине бункера БЗУ, т. е. когда бо́льшая его часть попадает к центру печи и обеспечивается практически непрерывная подпитка известняком зоны плавления. Этим объясняются и заметно меньшие колебания содержания серы в пробах чугуна и более низкое среднее содержание серы на

данном этапе по сравнению с остальными. Наименьшие колебания основности шлака также достигнуты при размещении известняка в верху бункера БЗУ, поскольку известняк в печь поступал в этом случае при активном смешивании с окатышами при выгрузке из бункера.

Таблица 5

Среднеквадратичные отклонения компонентов продуктов плавки по выпускам при различном размещении известняка в бункере БЗУ

этап σ_n	Низ бункера	Середина бункера	Верх бункера
$\sigma_{\text{осн шлака}}$	0,022	0,017	0,017
σ_{CaO}	0,503	0,397	0,45
$\sigma_{\text{[Si]}}$	0,036	0,023	0,019
$\sigma_{\text{[Ti]}}$	0,055	0,037	0,038
$\sigma_{\text{[V]}}$	0,057	0,030	0,022
$\sigma_{\text{[S]}}$	0,0041	0,0032	0,0040
$\sigma_{\text{[Mn]}}$	0,045	0,026	0,022

Сравнение всех значений (за исключением σ_{CaO}) дисперсий ($D = \sigma^2$) по критерию Фишера ($F = 1,64 \div 3,0 > F_{\text{крит}} = 1,615$) показало значимость различий при размещении известняка на дне и в середине бункера БЗУ.

Совместное использование разработанных мероприятий, а именно предварительное смешивание агломерата и окатышей при размещении известняка в середине бункера БЗУ обеспечило снижение колебаний основности шлака почти в 2 раза ($0,0332/0,017$) при существенной достоверности различий по критерию Фишера ($F = 3,8 \gg F_{\text{крит}} = 1,62$).

Таким образом, разработанные мероприятия по повышению стабильности состава продуктов доменной плавки, заключающиеся в рациональном размещении компонентов шихты в бункере БЗУ, позволяют оптимизировать состава шихты при использовании синтетического флюса. Установлено, что необходимо стремиться к размещению флюса ближе к центру печи, особенно при небольших его расходах. Это достигается расположением его в середине бункера БЗУ. Данный вывод правомерен при использовании любых добавок в небольших количествах, особенно отличающихся от среднего состава шихты. Экспериментально установлено, что при предварительном

смешивании агломерата и окатышей повышается стабильность химического состава жидких продуктов плавки – чугуна и шлака, а также улучшается газопроницаемость столба шихты.

В пятой главе рассмотрены вопросы оптимизации загрузки периферийной зоны доменной печи. Протекание процессов в периферийной зоне доменной печи оказывает преобладающее влияние на ход плавки в целом, поскольку площадь данной зоны несоизмеримо больше центральной части и имеются более благоприятные условия для прохождения газа. Целью управления рудной нагрузкой по радиусу печи является ее выбор и корректировка на периферии при изменении температуры кладки шахты и заплечиков. Математическая модель оценки влияния режимных параметров на состав и температуру газов в периферийной зоне построена на закономерностях тепло- и массообмена в доменной печи.

Известно, что стойкость гарниссажа в районе заплечиков определяется содержанием FeO в первичном шлаке. Содержание FeO в первичном шлаке зависит от развития реакций косвенного восстановления оксидов железа, а относительное изменение степени косвенного восстановления определяется удельным изменением расхода газа в периферийной зоне:

$$\frac{\Delta R_i}{R_i} = \frac{\Delta \frac{V_G}{P}}{\frac{V_G}{P}}$$

Из уравнения Эргона получена зависимость изменения количества газов при изменении порозности слоя

$$\frac{\Delta V_G}{V_G} = \sqrt{\frac{\varepsilon^3 \cdot (1 - \varepsilon^*)}{(\varepsilon^*)^3 \cdot (1 - \varepsilon)}} - 1$$

Разработанная методика и созданная на ее основе математическая модель позволяют прогнозировать изменения относительного количества газов и степени косвенного восстановления при изменении рудной нагрузки в периферийной зоне печи.

Для расчета температуры газов эти уравнения дополнены известными уравнениями теплообмена:

$$m = 0.5 \cdot \left(1 + \frac{c_{\text{ш}} \cdot G_{\text{ш}}}{c_{\text{г}} \cdot V_{\text{г}}}\right);$$

$$m = \frac{t_0 - t_{\text{к}}}{t_{\text{г0}} - t_{\text{шк}}} ;$$

$$\Delta m = -(m - 0.5) \cdot \left(\frac{\Delta(c_{\text{ш}} \cdot G_{\text{ш}})}{c_{\text{ш}} \cdot G_{\text{ш}}} - \frac{\Delta(c_{\text{г}} \cdot V_{\text{г}})}{c_{\text{г}} \cdot V_{\text{г}}}\right);$$

$$\Delta t_{\text{г}} = \Delta m (t_{\text{ш0}} - t_{\text{шк}}).$$

Благодаря разработанной модели были выработаны количественные рекомендации по нормализации работы периферийной зоны. В частности, было предложено перераспределить рудную нагрузку с целью усиления в периферийной зоне косвенного восстановления и снижения за счет этого массовой доли FeO в первичных шлаках. Снижение же массовой доли FeO в первичных шлаках должно сопровождаться повышением температуры начала плавления железорудных материалов и стабилизации температур в районе заплечиков.

Таким образом, умеренная разгрузка периферии должна привести к снижению температуры заплечиков и увеличению температуры периферийных газов под колошником, что и подтвердила практическая проверка (рис. 10).

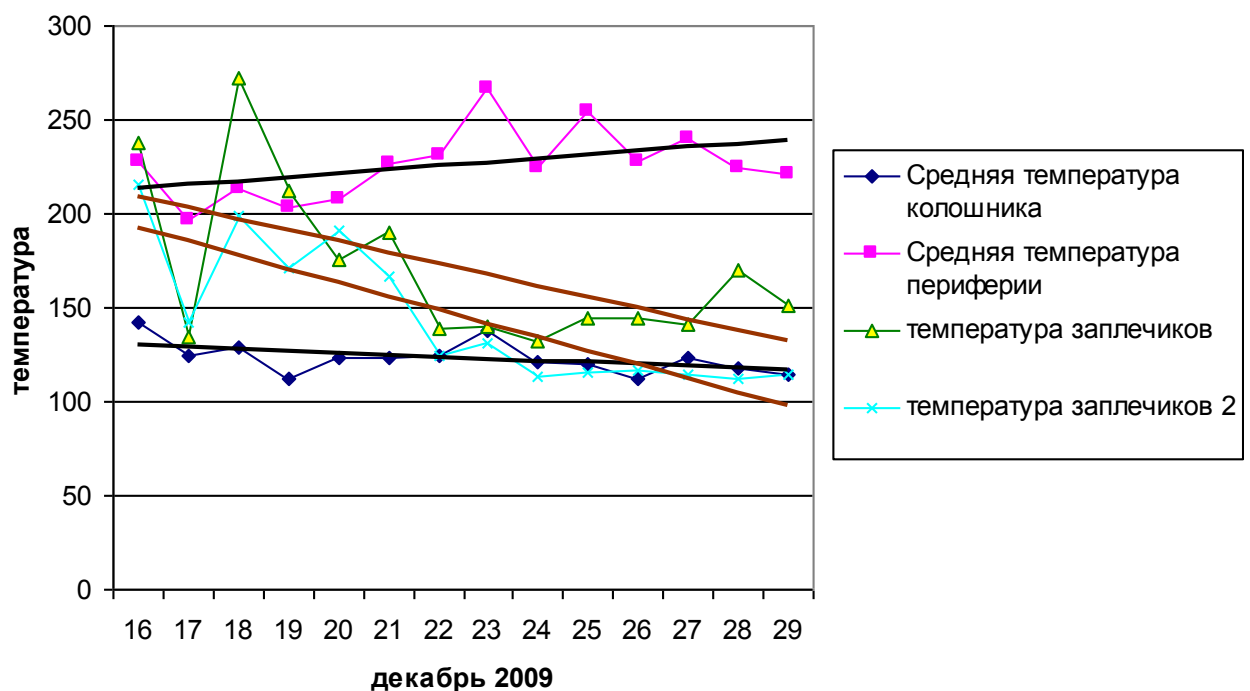


Рис. 10. Среднесуточные температуры колошниковых газов, неохлаждаемой части шахты и тела холодильников заплечиков доменной печи №5

Основные выводы и заключение

1. В результате экспериментального изучения траекторий движения шихты адаптирована модель, позволяющая прогнозировать укладку материала на колошнике доменных печей, оборудованных бесконусным загрузочным устройством.

2. Установлено, что одной из причин колебаний химического состава продуктов плавки является неравномерность распределения компонентов железорудных материалов и флюсов по сечению колошника.

3. Научно обоснован, разработан и внедрен комплекс рекомендаций по совершенствованию загрузки шихты на доменных печах, оборудованных бесконусным загрузочным устройством, что обеспечило снижение доли некондиционного чугуна по содержанию серы с 3,4 до 2 % (абсолютных) и увеличение коэффициента извлечения ванадия с 81,74 до 82,86 % (абсолютных).

4. Показано, что обеспечение стабильного гарниссажа в районе заплечиков печи может быть достигнуто путем управления рудной нагрузкой в периферийной зоне печи. Предложена математическая модель для реализации такого управления.

5. Результаты диссертационного исследования могут использоваться, как для совершенствования технологии выплавки чугуна на доменных печах, так и служить основой при принятии реконструктивных и проектных решений.

Основное содержание диссертационной работы отражено в следующих публикациях:

1. Пыхтеева К.Б., Загайнов С.А., Тлеугабулов Б.С., Филиппов В.В., Журавлев Д.Л., Николаев Ф.П. Анализ особенности формирования порций и истечение материалов из бункера БЗУ при скиповой загрузке многокомпонентной шихты. Сталь. № 6, 2008 г., с. 14 – 19.

2. Пыхтеева К.Б., Загайнов С.А., Тлеугабулов Б.С., Филиппов В.В., Николаев Ф.П., Белов В.В. Стабилизация состава продуктов доменной плавки

титаномагнетитов при загрузке шихты БЗУ лоткового типа. Сталь. № 1, 2009 г., с. 16 – 20.

3. Пыхтеева К.Б., Загайнов С.А., Филатов С.В., Филиппов В.В., Тлеугабулов Б.С. Оптимизация загрузки многокомпонентной шихты с использованием БЗУ. Сталь. №4, 2010 г., с. 23 – 24.

4. *Pykhteeva K.B., Tleugabulov B.S., Zagainov S.A., Filippov V.V., Nikolaev F.P., Belov V.V. Stabilizing the composition of blast-furnace products from titanomagnetites with a nonconical loading trough. Steel in Translation. 2009. T. 39. № 1. С. 45-49.*

5. Пыхтеева К.Б., Загайнов С.А., Собянина О.Н., Филиппов В.В. Анализ доменной плавки при производстве ванадиевого чугуна. Международная научно-практическая конференция «Повышение качества образования и научных исследований» в рамках VII Сатпаевских чтений, Экибастуз, 2008 г., с. 370 – 374.

6. Пыхтеева К.Б., Загайнов С.А., Ситников В.А., Филатов С.В., Тлеугабулов Б.С. Исследование особенности формирования столба шихтовых материалов при использовании бесконусного загрузочного устройства. Труды международной научно-практической конференции «Творческое наследие Б.И. Китаева», Екатеринбург, 2009 г., с. 252 – 256.

7. Пыхтеева К.Б., Загайнов С.А., Филатов С.В., Филиппов В.В., Тлеугабулов Б.С. Оптимизация загрузки многокомпонентной шихты с использованием БЗУ. Доменное производство – XXI век. Труды Международного конгресса доменщиков. г. Москва, 2010. С. 103-105.

8. Пыхтеева К.Б. Управление загрузкой и распределением шихты на колошнике модернизированных доменных печей НТМК. Материалы 38-ой международной научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «НТМК», г. Н. Тагил, 2006 г.

9. Пыхтеева К.Б. Методика оценки влияния параметров загрузки и газового потока при выплавке ванадиевого чугуна. Материалы 39-ой международной научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «НТМК», г. Н. Тагил, 2007 г.

10. Пыхтеева К.Б., Загайнов С.А., Онорин О.П., Тлеугабулов Б.С., Собянина О.П. Исследование работы агрегатов и систем доменной печи № 5 и разработка технологии производства ванадиевого чугуна. ОАО «Черметинформация», бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия», № 7, 2008 г., с. 70.

11. Пыхтеева К.Б., Загайнов С.А., Онорин О.П., Тлеугабулов Б.С., Собянина О.П. Разработка и выдача рекомендаций по стабилизации состава продуктов плавки при выплавке ванадиевого чугуна. ОАО «Черметинформация», бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия», № 7, 2008 г., с. 70.

12. Пыхтеева К.Б., Загайнов С.А. Определение и выбор параметров работы бесконусного загрузочного устройства (БЗУ) лоткового типа доменной печи № 5 ОАО «НТМК». Научные труды XIV отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2008 г.

13. Пыхтеева К.Б., Загайнов С.А. Влияние порядка загрузки известняка на стабильность состава продуктов доменной ванадиевой плавки. Научные труды XIV отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2008 г. Ч. 3, с. 47 – 48.

14. Пыхтеева К.Б., Загайнов С.А. Алгоритм формирования и истечения материалов из бункера бесконусного загрузочного устройства доменной печи № 5 ОАО «НТМК». Материалы региональной научно-практической конференции: «Молодежь и наука», г. Нижний Тагил, 2007 г., с. 75 – 77.

15. Пыхтеева К.Б., Чернова А.В. Сравнение комплексов загрузки модернизированных доменных печей ОАО «НТМК». Материалы региональной научно-практической конференции: Молодежь и наука, Нижний Тагил, 2007 г., с. 79 – 81.

16. Пыхтеева К.Б., Тлеугабулов Б.С., Огурцов А.А. Формирование состава шихты по сечению колошника при загрузке БЗУ. Материалы региональной научно-технической конференции «Наука – Образование – Производство»: опыт и перспективы развития, г. Нижний Тагил, 2009 г., с. 165 – 166.

17. Пыхтеева К.Б., Огурцов А.А. Разработка программного обеспечения для расчета распределения материалов на колошнике доменных печей, оборудованных БЗУ лоткового типа. «Молодежь и наука»: материалы Региональной научно–практической конференции студентов: в 2 т. – Т. 1. – Нижний Тагил: НТИ (ф) УГТУ-УПИ, 2009. – С. 83-85.

18. Пыхтеева К.Б., Кенич И.Ю., Куянов В.И. Об эффективности использования БЗУ. «Молодежь и наука»: материалы региональной научно-практической конференции студентов и аспирантов НТИ (ф) УГТУ-УПИ, Нижний Тагил, 2010 г. С. 93 – 95.

19. Пыхтеева К.Б., Васильева А.Д. Влияние состава шихты на стабильность состава продуктов доменной плавки титаномагнетитов. Материалы региональной научно-технической конференции «Наука – Образование – Производство»: опыт и перспективы развития, г. Нижний Тагил, 2011 г. С. 32 – 33.

20. Пыхтеева К.Б., Покровский А.О. Разработка методики работы бесконусного загрузочного устройства доменной печи № 5 ОАО «НТМК». «Молодежь и наука»: материалы региональной научно-практической конференции студентов и аспирантов НТИ (ф) УГТУ-УПИ в 2-х томах, Нижний Тагил, 2009 г. Том 1. С. 88 – 89.

Работа подготовлена при поддержке гранта Роснауки № 02.740.11.0152